

EL3003 LABORATORIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

MAQUINAS ELÉCTRICAS ROTATORIAS

ASPECTOS CONSTRUCTIVOS- CLASIFICACIÓN- CONCEPTOS GENERALES

Un motor eléctrico es un sistema que convierte energía eléctrica en energía mecánica. El primer detalle que hemos de tener en cuenta de un motor eléctrico es que su movimiento es consecuencia de fuerzas que se producen por culpa de campos magnéticos que se crean en su interior. Estos campos son creados por corrientes eléctricas que se hace circular a través de bobinas. En los motores pequeños, utilizados por ejemplo para grabadoras portátiles, juguetes, etc., se combinan los campos creados por la corriente eléctrica y los que ofrecen imanes permanentes.

Normalmente los motores son máquinas reversibles. Esto significa que si les aplicamos energía mecánica haciéndole girar su eje, ellos la convierten en eléctrica, comportándose como dinamos, si producen corriente continua, o alternadores si es alterna. Los generadores y alternadores, transforman algún tipo de energía (normalmente mecánica) en energía eléctrica.

1.- ASPECTOS CONSTRUCTIVOS

Una máquina eléctrica rotatoria está compuesta de los siguientes partes:

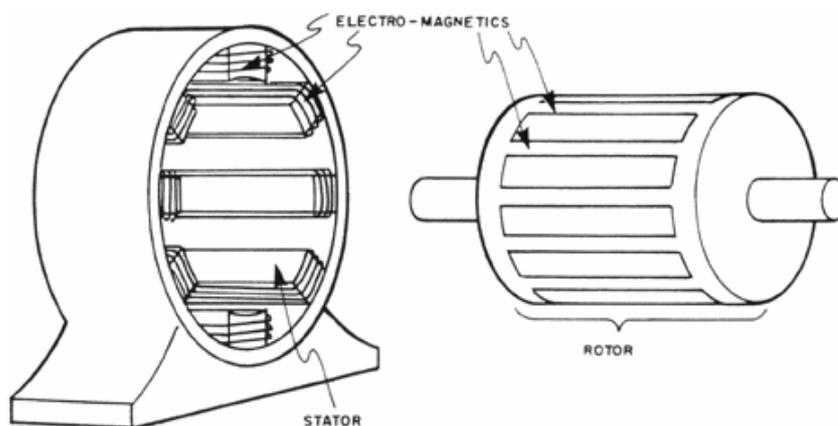


Figura 1 Partes principales de la máquina eléctrica rotatoria

Un circuito magnético:

- Estator. Parte fija.
- Rotor. Parte móvil que gira dentro del estator.
- Entrehierro. Espacio de aire que separa el estator del rotor y que permite que pueda existir movimiento. Debe ser lo más reducido posible (fracciones de mm).

Dos circuitos eléctricos, uno en el rotor y otro en el estator.

- Bobina de excitación o inductor. Uno de los devanados, al ser recorrido por una corriente eléctrica produce una fuerza magnetomotriz que crea un flujo magnético.
- Bobina de Inducido. El otro devanado, en el que se induce una f.e.m. que da lugar a un par motor (si se trata de un motor) o en el que se induce una f.c.e.m. que da lugar a un par resistente (si se trata de un generador).

En toda máquina se pueden distinguir tres tipos de materiales:

- Materiales activos:
 - Materiales magnéticos de alta permeabilidad, hierro, acero, chapa al silicio,
 - Materiales eléctricos conductores, cobre, aluminio,
- Aislantes, que se encargan de canalizar las corrientes y evitar fugas.
- Materiales para la lubricación, ventilación, transmisiones mecánicas.

Clasificación

| | Corriente Continua | Corriente Alterna |
|-------------|---|--|
| Generadores | <u>Dinamo.</u> Según la excitación, independiente, serie, shunt, compound. | <u>Alternador.</u> Monofásico o polifásico. Polos lisos o salientes. |
| Motores | <u>Motor de corriente continua.</u> Según la excitación, independiente, serie, shunt, compound | <u>Motor de corriente alterna.</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>Inducción</u> o asíncronos. (rotor de jaula de ardilla o rotor devanado) ▪ <u>Síncronos</u> ▪ <u>Universales</u> |

2.- CONCEPTOS GENERALES

Potencia: Es la energía que desarrolla por unidad de tiempo; en una máquina eléctrica se puede distinguir entre:

- **Potencia eléctrica**, que absorbe de la red eléctrica (motor) o que entrega a la red (generador).
- **Potencia mecánica**, que cede a la carga (motor) o que se le proporciona al eje a través de una turbina (generador).

Potencia útil:

- Para un motor, será la potencia mecánica que se puede obtener del movimiento de su eje.
- Para un generador, será la potencia eléctrica que proporciona.

Potencia nominal: Valor de la potencia útil que caracteriza el funcionamiento de la máquina.

Placa de características: Placa metálica que se coloca en un lugar visible y que contiene el conjunto de las condiciones de servicio que han sido previstos por el constructor como funcionamiento normal.

Si la máquina funciona a la **potencia nominal**, se dice que funciona **a plena carga**. Se puede trabajar a media carga, a $\frac{3}{4}$ de la carga o incluso por encima de la potencia nominal, sobrecarga.

La potencia está sobretodo limitada por el calentamiento de la máquina.

Rendimiento: Siempre hay una parte de la energía que se absorbe que no puede transformarse en energía útil como consecuencia de las diferentes pérdidas de energía que se producen:

- Pérdidas en los conductores eléctricos o pérdidas en el cobre.
- Pérdidas en los circuitos magnéticos, provocadas por la histéresis o por las corrientes parásitas, o pérdidas en el hierro.
- Perdidas mecánicas, rozamientos, ventilación,...

El rendimiento es:

$$\eta = \frac{\text{Potencia útil}}{\text{Potencia absorbida}}$$

Característica torque-velocidad de un motor: Es una gráfica en la que se representan las variaciones en los pares (par = fuerza x radio) de giro del eje en función de la velocidad.

Sobre los conductores que forman el inducido de una máquina rotativa se desarrollan fuerzas que hacen girar al rotor. Cada fuerza produce un determinado momento y el momento de rotación de la máquina vendrá dado por la suma de todos los momentos elementales. En un generador el momento se opone al movimiento de arrastre de la turbina que lo acciona. Se denomina par o momento resistente. En un motor, determina el giro del motor, se denomina par motor.

La velocidad de funcionamiento viene fijada por el punto para el cual el par que el motor puede suministrar es igual al par que la carga necesita para funcionar.

En el funcionamiento del motor se distinguen tres fases:

- **Arranque:** Se conecta el motor a la red eléctrica. Se tienen que vencer los rozamientos y la inercia. El momento de rotación se denomina **par de arranque**.
- **Aceleración.** Hasta que el motor alcanza la velocidad nominal.
- **Régimen nominal:** El motor está funcionando y mantiene una velocidad constante. En el régimen nominal el par motor es igual al par resistente.

3.- MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA DE INDUCCIÓN O ASÍNCRONOS.

Es el motor industrial por excelencia debido a su sencillez, su fortaleza y su seguridad de funcionamiento. Se basan en la generación de un campo magnético giratorio en el estator que corta a los conductores del rotor y los hace girar.

- Consiguen una velocidad bastante estable.
- Tienen un buen par de arranque. (*Par es sinónimo de torque*)
- Su velocidad depende de la frecuencia de la corriente alterna y para variarla se pueden usar variadores electrónicos de frecuencia.

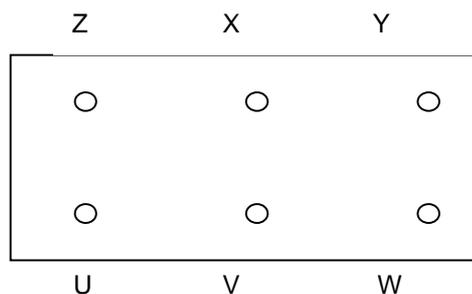
En el estator se alojan tres bobinas, desfasadas entre sí 120° . Cada una de las bobinas se conecta a una de las fases de un sistema trifásico y dan lugar a un campo magnético giratorio. La velocidad del campo magnético giratorio se denomina velocidad síncrona (ω_s ó n_s) y depende de la frecuencia de la red eléctrica a la que esté conectado el motor y del número p de polos. Para un devanado con p polos:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$

(velocidad de giro del campo magnético, o velocidad de sincronismo en r.p.m.)

Conexión de los devanados del estator de un motor trifásico

En la caja de bornes de los motores aparecen seis terminales que corresponden a las tres bobinas del estator del motor. La disposición de los terminales se hace siempre de la misma forma, siguiendo normas internacionales. U V W son los terminales de entrada de cada uno de los devanados y, X Y Z son los correspondientes terminales de salida. En la placa están dispuestos de esta forma:



Estos devanados del estator se pueden conectar en estrella o en triángulo. Un motor que en su placa de características aparezcan las tensiones 380/220 V nos indica que se puede conectar en estrella a la tensión mayor 380 Volts, ya que cada devanado estará sometido a $380/\sqrt{3} = 220$ Volts y en triángulo a la menor 220 Volts. De esta forma un devanado estará siempre sometido a la tensión de 220Volts.

El rotor, es la parte móvil giratoria que se localiza en el interior del estator. Está hecho a base de placas apiladas y montado sobre el eje del motor. Dispone de unas ranuras donde van colocados los conductores que forman la bobina de inducido que están cerrados sobre sí mismos.

constituyendo un circuito cerrado. Al ser afectados los conductores por un campo magnético variable se generan en ellos f.e.m. que dan lugar a corrientes eléctricas. Al circular las corrientes eléctricas por unos conductores dentro de un campo magnético, aparecen fuerzas que obligan al rotor a moverse siguiendo al campo magnético.

Desde el punto de vista constructivo se pueden distinguir dos formas típicas de rotor:

- **Rotor de jaula de ardilla.** Está constituido por barras de cobre o de aluminio y unidas en sus extremos a dos anillos del mismo material.



- **Rotor bobinado o de anillos rozantes.** El rotor está constituido por tres devanados de hilo de cobre conectados en un punto común. Los extremos pueden estar conectados a tres anillos de cobre que giran solidariamente con el eje (anillos rozantes). Haciendo contacto con estos tres anillos se encuentran unas escobillas que permiten conectar a estos devanados unas resistencias que permiten regular la velocidad de giro del motor. Son más caros y necesitan un mayor mantenimiento.



La velocidad de giro del rotor es algo inferior a la velocidad de sincronismo. **El deslizamiento** es un concepto que se introduce para medir esta diferencia de velocidades. Se expresa en porcentaje.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100$$

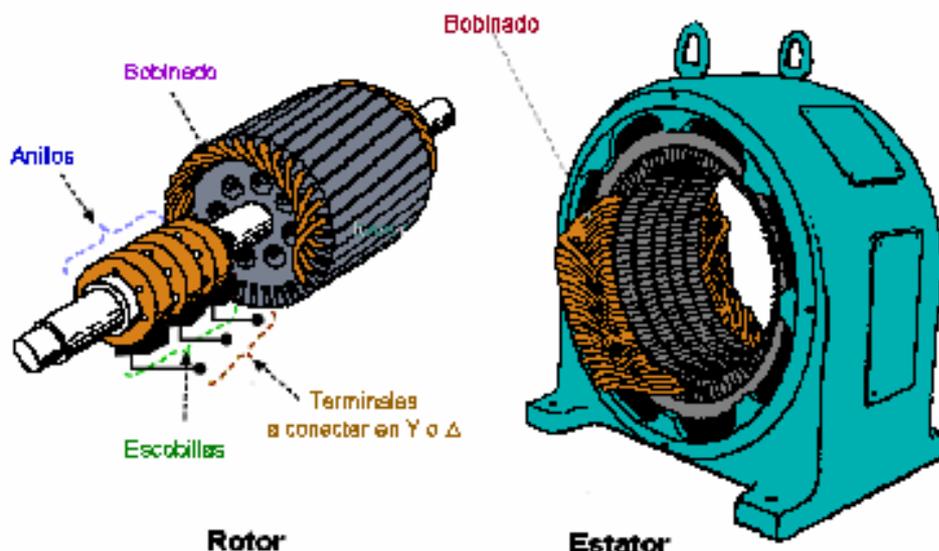
El deslizamiento varía con la carga; en vacío el deslizamiento es mínimo y suele tener unos valores en torno al 0.1%, en carga el rotor tiende a frenarse y el deslizamiento aumenta a unos valores en torno al 4%.

Cuando el motor pasa de funcionar en vacío a arrastrar una carga mecánica el rotor tiende a frenarse, esto hace que el movimiento relativo del campo magnético y los conductores del rotor aumente, aumentando las f.e.m., aumentando las corrientes, y aumentando el par de fuerzas que obliga al rotor a moverse siguiendo el campo magnético.

El **par útil** M_u que suministra el motor viene determinado por la ecuación:

$$M_u = \frac{P_u}{\omega}$$

Siendo P_u potencia útil (w), y ω la velocidad angular de giro del eje en rad/seg.



Funcionamiento

En el arranque, al conectar el estator, surge el campo magnético giratorio que interactúa con los conductores del rotor induciendo en ellos f.e.m. y corrientes muy elevadas (de cientos de amperios). Estas corrientes al interactuar con el campo magnético producen fuertes fuerzas en los conductores del rotor provocando un fuerte par de arranque. Al aumentar las corrientes en el rotor, estas producen f.m.m. que obligan a ser compensados desde el estator aumentando también las corrientes que se absorben de la red.

En cuanto empieza a circular corriente por los conductores del rotor, este empieza a girar con un movimiento acelerado en el mismo sentido que el campo magnético giratorio. El movimiento relativo entre el rotor y el estator empieza a disminuir y disminuyen la f.e.m. y las corrientes del rotor y del estator. El rotor alcanza el equilibrio cuando se iguala el par resistente ofrecido por la carga y el par motor. Si se sobrepasa el par máximo que puede producir el motor y llega a pararse, las corrientes en el rotor y también en el estator se elevan a valores muy elevados que pueden llevar a destruirlo.

Al conectar el motor a la red, este absorbe una intensidad de corriente muy fuerte en el momento del arranque. Estas corrientes de arranque sobrecargan las líneas de distribución y producen caídas de tensión y sobrecalentamientos. Son perjudiciales para el motor y para la red de distribución. Una forma de reducir la corriente de arranque es reducir la tensión aplicada al motor. De esta forma también se reduce el par de arranque ya que disminuye el flujo del estator y con él la f.e.m. inducida en el rotor y la intensidad de corriente en el rotor.

Inversión de giro de un motor asíncrono trifásico.

Para conseguir invertir el sentido de giro es necesario invertir el sentido del campo giratorio del estator. Esto se consigue invirtiendo la conexión de **dos** de las fases del motor. Esta maniobra se realiza utilizando automatismos a base de contactores.

Clasificación NEMA de los motores asíncronos trifásicos

Los motores trifásicos de potencias mayores de 1 HP son clasificados por las normas NEMA, según el diseño de la jaula del rotor de la siguiente manera:

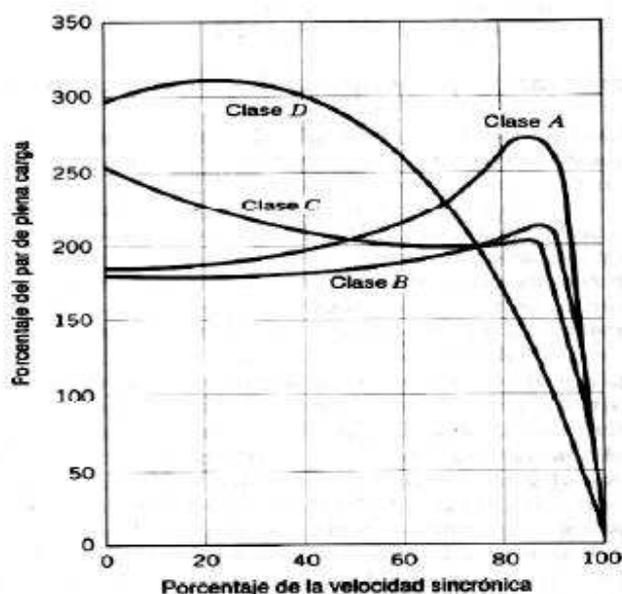


Tabla 1 Características de los motores comerciales de inducción de jaula de ardilla de acuerdo con la clasificación en letras NEMA.

| Clase NEMA | Par de arranque (# de veces el nominal) | Corriente de Arranque | Regulación de Velocidad (%) | Nombre de clase Del motor |
|------------|---|-----------------------|-----------------------------|--|
| A | 1.5-1.75 | 5-7 | 2-4 | Normal |
| B | 1.4-1.6 | 4.5-5 | 3.5 | De propósito general |
| C | 2-2.5 | 3.5-5 | 4-5 | De doble jaula alto par |
| D | 2.5-3.0 | 3-8 | 5-8 , 8-13 | De alto par alta resistencia |
| F | 1.25 | 2-4 | mayor de 5 | De doble jaula, bajo par y baja corriente de arranque. |

*Los voltajes citados son para el voltaje nominal en el arranque.

Modos de operación de un motor de inducción trifásico

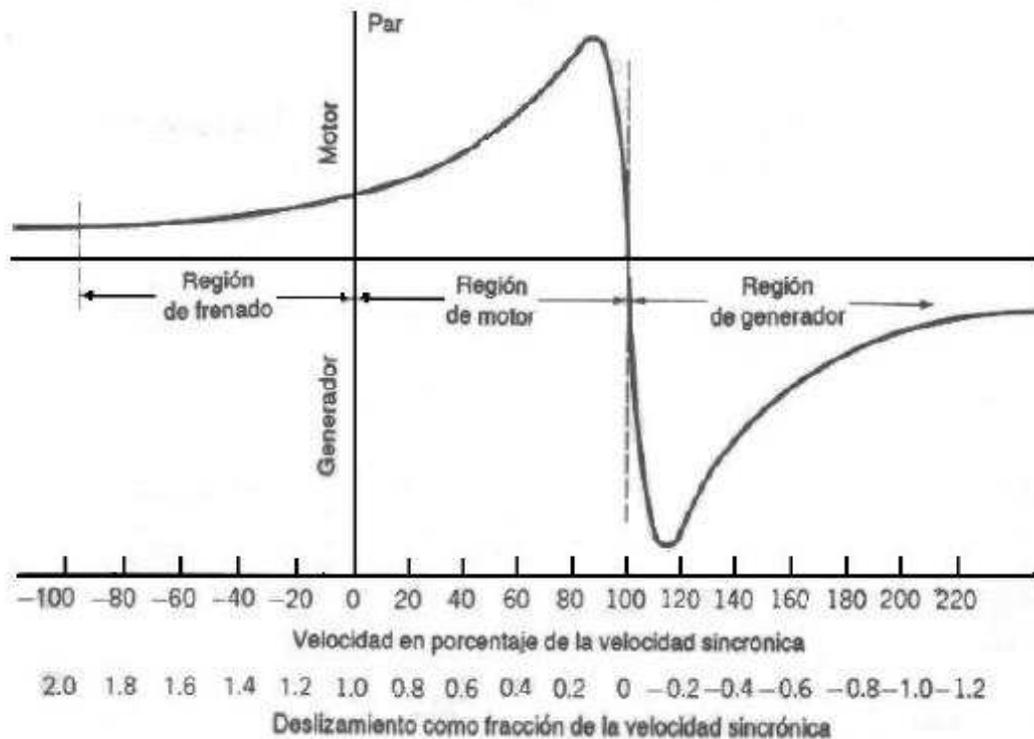
La característica de reversibilidad de la maquinaria eléctrica permite flexibilizar la operación de un motor de inducción trifásico, identificándose tres modos característicos:

Modo de operación como freno eléctrico: cuando la máquina está mecánicamente acoplada a un accionador que la hace girar en sentido contrario al sentido de giro del flujo magnético rotatorio. En estas condiciones, la velocidad mecánica pasa a ser negativa, (pues la velocidad del flujo rotatorio es la referencia) y el deslizamiento es superior a 1,0. El torque (o par) en consecuencia es un torque resistente para el accionador y tiende a frenarlo.

Modo de operación como generador: se requiere también en este caso otro elemento accionador que haga girar el rotor a una velocidad superior a la velocidad síncrona. Por lo tanto, el deslizamiento resulta negativo y también el torque: la máquina de inducción está actuando como carga mecánica, recibiendo una potencia mecánica en el eje y puede generar energía eléctrica en el estator. La generación de energía eléctrica en máquinas con rotor jaula de ardilla no es eficiente, por lo que este modo de operación no es frecuente.

Modo de operación como motor: es sin duda el modo de operación más frecuente; corresponde a un ingreso de potencia eléctrica desde el estator, que actúa generando el flujo magnético rotatorio girando a velocidad síncrona. En el rotor aparecen corrientes inducidas que interactúan con el flujo, provocando un torque motriz y un deslizamiento entre 0 y 1,0 el cual depende de la carga mecánica acoplada.

En la Figura siguiente se grafica los tres modos de operación de la máquina de inducción trifásica.



En la industria cerca del 90% de la energía consumida es utilizada para la demanda de fuerza motriz en todo tipo de accionamientos. Esta demanda se cubre, en su mayor parte y para velocidades constantes, mediante los motores de inducción monofásicos y trifásicos. Las aplicaciones más importantes de este tipo de motor se clasifican de acuerdo a la variación del torque en función de la velocidad:

- Par resistente constante: Ascensores, bombas y compresores de pistón, bandas transportadoras, máquinas y herramientas con fuerza de corte constante, laminadoras, agitadores, molinos, etc.
- Par resistente creciente proporcional a la velocidad: Calandrias.
- Par resistente creciente proporcional al cuadrado de la velocidad: Bombas centrífugas, ventiladores, compresores rotativos, soplantes centrífugos, etc.
- Par resistente decrece con la velocidad: Tornos, máquinas bobinadoras.

La desventaja de los motores asíncronos es que presentan un alto consumo de energía reactiva, por lo que el factor de potencia (relación Potencia aparente total / potencia útil) en ocasiones resulta bajo. En la tabla 2 se indican los factores de potencia correspondientes a una serie de motores de una marca determinada, de diferentes potencias y velocidades.

Tabla 2.- Variación del factor de potencia con la velocidad y la potencia para una serie típica de motores asíncronos de rotor devanado (aislamiento clase B, protección IP44)

| Potencia (kW) | Velocidad (R. P. M.) | | | |
|---------------|----------------------|------|------|------|
| | 3000 | 1500 | 1000 | 750 |
| 1,1 | 0,85 | 0,81 | 0,75 | 0,74 |
| 3,0 | 0,86 | 0,83 | 0,75 | 0,75 |
| 11,0 | 0,86 | 0,86 | 0,78 | 0,77 |
| 30,0 | 0,87 | 0,87 | 0,85 | 0,84 |
| 55,0 | 0,87 | 0,87 | 0,87 | 0,85 |
| 90,0 | 0,90 | 0,87 | 0,87 | 0,85 |
| 160,0 | 0,90 | 0,87 | 0,87 | 0,85 |
| 300,0 | 0,92 | 0,89 | 0,87 | 0,85 |

Con respecto a la utilización o no de motores monofásicos, éstos son útiles cuando la potencia requerida para accionar la carga es pequeña y se disponga únicamente de suministro de energía monofásica. Por ejemplo, para electrodomésticos (aspiradoras, refrigeradores, ventiladores, batidoras, etc.), equipos de oficina, máquinas y herramientas portátiles, accionamientos pequeños industriales, equipos para agricultura (motores de baja potencia), etc. Algunas características desfavorables de este tipo de motor, en comparación con los motores trifásicos, son:

- La caída de velocidad al aumentar el par resistente (torque) es más alta.
- El rendimiento es menor.
- El factor de potencia es más reducido que en los motores trifásicos.

4.- MÁQUINA SINCRÓNICA

En una máquina rotatoria elemental formada por una bobina plana fija en el espacio y expuesta a un campo magnético constante en el tiempo que gira a velocidad constante, se induce un voltaje alterno sinusoidal en los terminales de la bobina debido a la variación en el tiempo del flujo enlazado por ésta, de acuerdo a la ley de Faraday. La frecuencia de tensión inducida está ligada directamente con la velocidad angular en el eje.

El principio fundamental de operación de las máquinas de corriente alterna es la generación de un campo magnético rotatorio, el cual hace que el rotor gire a una velocidad que depende de la velocidad de rotación de dicho campo.

Para generar un campo magnético rotatorio en el estator y en el entrehierro de una máquina de corriente alterna, por medio de corrientes alternas, se utiliza la estructura básica mostrada en la siguiente figura, correspondiente al esquema de una máquina sincrónica trifásica de 2 polos:

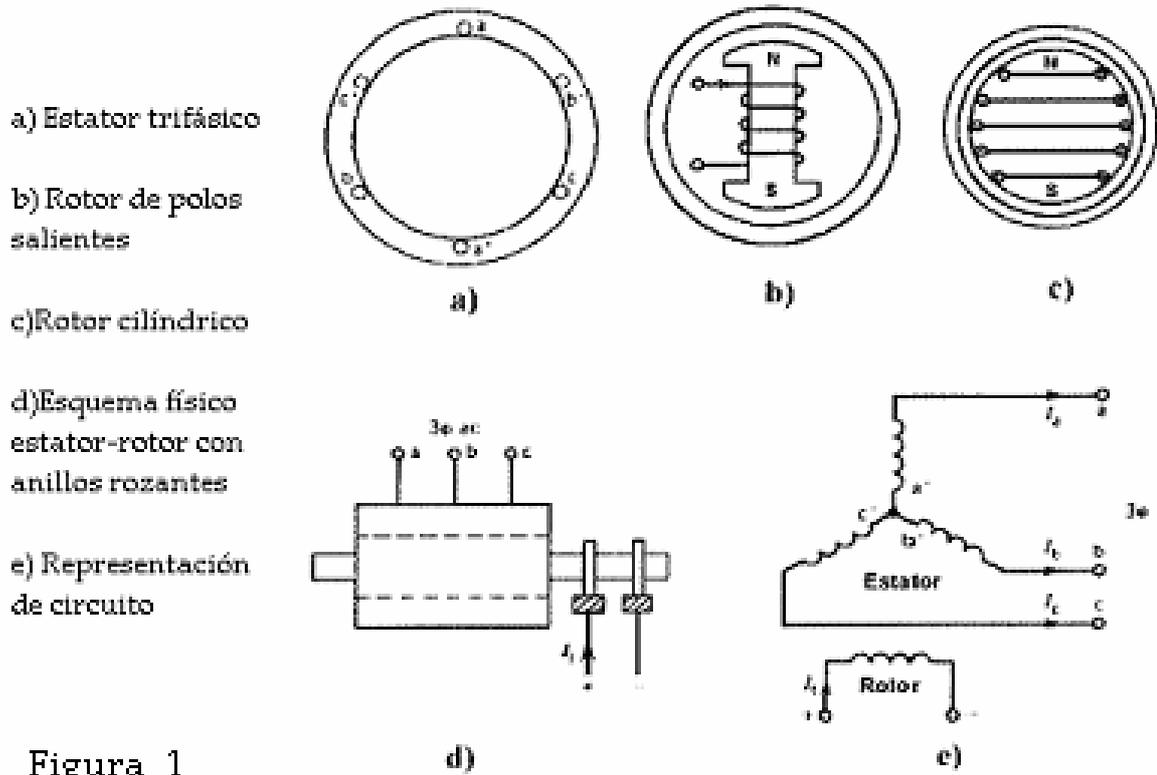
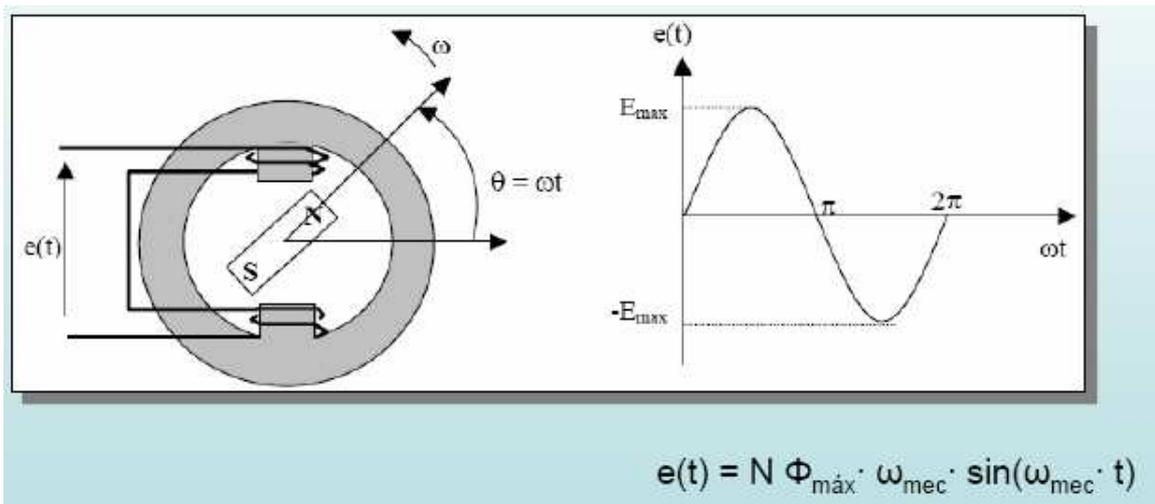


Figura 1

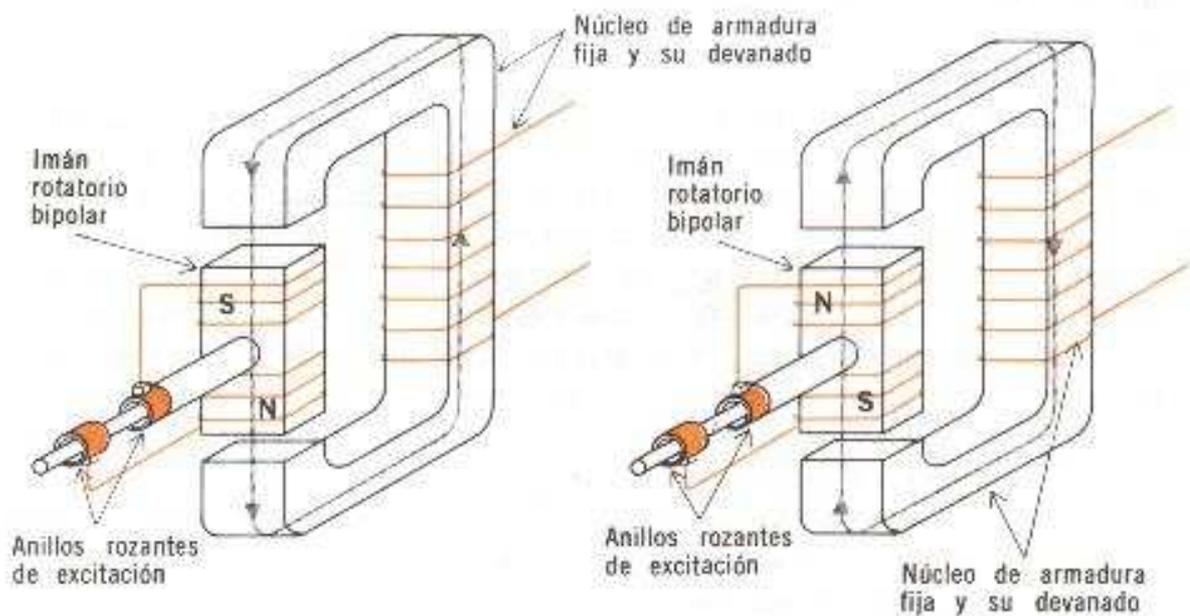
Observando el estator de la Figura anterior, se aprecia la existencia de tres juegos de devanados: a-a', b-b' y c-c'. Es fácil comprender que si se ubican bobinas fijas pero desplazadas en el espacio, los voltajes que se generan al estar expuestas a un flujo enlazado variable en el tiempo, estarán desfasados en el tiempo. En particular, si se emplean 3 bobinas espaciadas geoméricamente por 120° de separación en el espacio, se generarán voltajes en cada bobinado desfasados en 120° eléctricos; se obtiene un generador sincrónico trifásico.



En esta máquina, el devanado de campo está en el rotor, y la conexión se hace por medio de escobillas, en un arreglo similar al utilizado para las máquinas de corriente continua. El campo del rotor se obtiene por medio de una corriente continua suministrada al devanado del rotor, o por imanes permanentes. El rotor se conecta a una fuente mecánica de potencia (Máquina motriz, turbina) y rota a una velocidad constante. La velocidad del rotor es la misma del campo magnético giratorio y se denomina velocidad síncrona (ω_s ó n_s). Esta velocidad determina la frecuencia de la tensión eléctrica generada en las bobinas del estator y depende del número p de polos. Para un devanado con p polos:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$

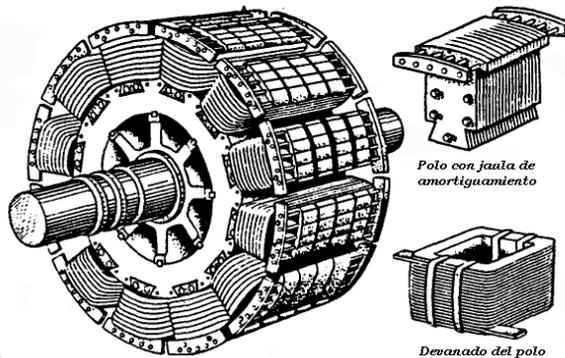
(velocidad de giro del campo magnético, o velocidad de sincronismo en r.p.m.)



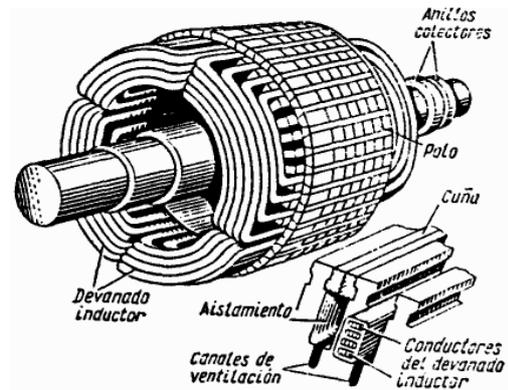
Los generadores síncronos trifásicos son los más importantes por su aplicación en sistemas eléctricos de potencia, ya que constituyen el dispositivo fundamental en cualquier central generadora.

Las máquinas síncronas son máquinas de corriente alterna que se caracterizan por tener la frecuencia de las variables eléctricas directamente dependiente con la velocidad de eje. Pueden ser monofásicas o polifásicas. Pueden ser empleadas como motores, generadores, e incluso como reactor y como condensador.

Por lo indicado, es necesario accionar mecánicamente el rotor de esta máquina para que el campo magnético generado por la corriente continua en el rotor, pueda girar e inducir voltajes alternos en el estator. Para este accionamiento se aplican turbinas hidráulicas, a vapor, motores a combustión, aspas de ventilador, etc. En este laboratorio, usaremos como elemento motriz para provocar el giro del rotor, un motor de corriente continua, con el cual se controlará la velocidad.



Rotor de polos salientes



Rotor cilíndrico

Motores Síncronos (o sincrónicos)

Se llaman sincrónicos por que su característica principal es la de girar a velocidad constante e igual a la velocidad sincrónica, la cual depende del numero de polos de la máquina (p) y la frecuencia de alimentación de la red (f):

$$\eta = (120 \times f) / 2p \quad \text{velocidad de giro (R. P. M.)}$$

Este tipo de motor sustituye a los motores asíncronos sólo en aplicaciones que requieran características especiales, como por ejemplo cargas que no requieran variación de velocidad o para la compensación de energía reactiva, dado que su factor de potencia es casi la unidad (1,0). También, presentan un mejor rendimiento que los asíncronos de la misma velocidad (aproximadamente un 2% mayor), pero son más costosos y precisan de un mantenimiento más cuidadoso que los motores asíncronos.

Para la utilización o no de este tipo de motor son indispensable factores como:

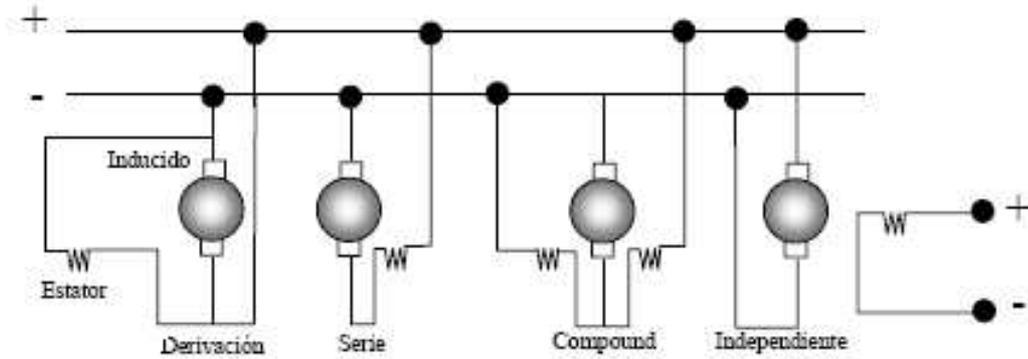
- Costo de la energía.
- Horas anuales de operación.
- Factor de potencia de la instalación.
- Precio del motor.
- Costos de mantenimiento.
- Y finalmente, que la velocidad de accionamiento sea constante.

5.- MOTOR ELÉCTRICO DE CORRIENTE CONTINUA

Este tipo de motor se clasifica de acuerdo al sistema de excitación en:

- Independiente.
- Paralelo (Derivación).
- Serie
- Compuesto o Compound (combinación serie / paralelo).

En la figura se presenta el esquema de los diferentes tipos de motores de corriente continua según el sistema de excitación utilizado.



Los motores de corriente continua se distinguen del resto de los motores eléctricos por su gran facilidad para la regulación de velocidad. Por tal motivo, son esenciales para todas aquellas aplicaciones que precise:

- Grandes variaciones de velocidad.
- Cambios o inversiones rápidas en la marcha.
- Control automático de pares y velocidad.

Y son ampliamente utilizados en industrias:

- Papeleras.
- Textileras
- Químicas.
- Alimenticias.
- Siderúrgicas.
- Metalúrgicas.

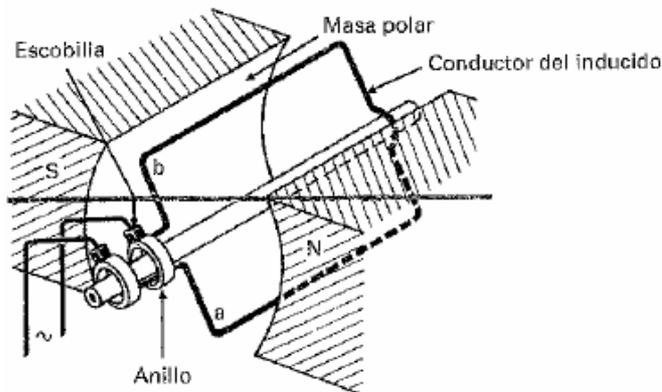


Figura 19.1. Alternador elemental.

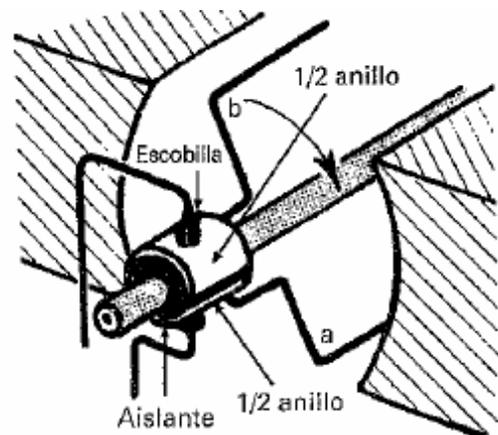


Figura 19.2. Colector de delgas de una dinamo.

